

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

**Kontrola zkratové odolnosti rozvoden průmyslového
podniku**

Short-circuit resistance checking of switching stations

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Karafiát**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Kontrola zkratové odolnosti rozveden průmyslového podniku**
Short-circuit Resistance Checking of Switching Stations

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor průmyslových rozvodů
2. Teoretický rozbor zkratových jevů
3. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle EN 60909
4. Výpočet zkratových poměrů na rozvodnách průmyslového podniku
5. Posouzení zkratové odolnosti rozveden

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta VŠB Ostrava, 1993.
2. Trojánek, Z.: Přejížděvé jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987.
3. Hradílek, Z.: Elektroenergetika II. Skripta VŠB Ostrava, 1993.
4. Pauza, J., Krychtálek, Z.: Elektrické stanice. SNTL Praha, 1989.
5. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
6. Technická dokumentace průmyslového podniku.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr.Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 24. Dubna 2012

.....
Pavel Karafiát

Poděkování

Děkuji panu Doc. Dr. Ing. Zdenku Medvecovi za odborné vedení a vstřícnost při zpracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje zkratovým poměrům v průmyslovém podniku. Práce je rozdělena do teoretické a praktické části. Teoretická část se věnuje rozvodu elektrické energie v průmyslovém podniku. Jsou zde rozebrány typy zkratů, účinky zkratového proudu a výpočet zkratového proudu podle normy ČSN – EN 60909.

V praktické části je podrobná ukázka výpočtu zkratových poměrů jednotlivých rozvodů průmyslového podniku vn. Jako metoda výpočtu je zvolena metoda výpočtu v poměrných hodnotách.

Klíčová slova

zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, zkratová odolnost, zkratová impedance, zkratové poměry

Abstract

The topic of the bachelor thesis is devoted to short-circuit ratio in the industrial enterprise. The thesis is divided in two parts, theoretical and practical part. Theoretical part focused on electric-power distribution in industrial enterprise, short-circuit effects and calculation of short-circuit current by ČSN – EN 60909.

The practical part deals with calculation of short circuit ratio on all switching points in the industrial enterprise. For calculation short circuit ratio is used method of proportional units.

Key words

short-circuit, short-circuit current, short-circuit power, short-circuit toughness, short-circuit impedance, short-circuit ratio

Seznam použitých symbolů a zkratek

i_{dc}	stejnoseměrná složka zkratového proudu
i_p	nárazový zkratový proud
k	koeficient pro výpočet oteplení při zkratu
l	délka kabelu [km]
nn	nízké napětí
t	čas
t_{min}	minimální doba vypnutí [s]
u_{kr}	jmenovité napětí nakrátko transformátoru [%]
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
α	teplotní součinitel
θ_e	teplota vodiče na konci zkratu [$^{\circ}\text{C}$]

A	počáteční hodnota stejnosměrné složky
ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
I_b	souměrný zkratový vypínací proud
I_k	ustálený zkratový proud [kA]
I_k''	počáteční souměrný rázový zkratový proud [kA]
I_{LR}	souměrný záběrový proud asynchronního motoru [A]
I_r	jmenovitý proud elektrického zařízení [A]
I_{th}	ekvivalentní oteplovací proud [kA]
I_v	vztažný proud
R_K	rezistance kabelu [Ω]
R_k	rezistance kabelu na kilometr délky [Ω/km]
R_L	rezistance vedení [Ω]
R_{L20}	rezistance při teplotě 20°C [Ω]
R_T	rezistance transformátoru [Ω]
R_v	rezistance vedení
S	průřez vodiče [mm^2]
S_k	zkratový výkon [MVA]
S_{kn}	jmenovitý zkratový výkon [MVA]
S_v	vztažný výkon
T_k	doba trvání zkratu [s]
U_n	jmenovité napětí sítě [kV]
U_r	jmenovité sdružené napětí soustavy [kV]
U_{rM}	jmenovité napětí motoru [kV]
U_{rT}	jmenovité napětí transformátoru [kV]
X_K	reaktance kabelu [Ω]
X_k	reaktance kabelu na kilometr délky [Ω/km]

X_M	reaktance motoru [Ω]
X_S	reaktance soustavy [Ω]
X_T	reaktance transformátoru [Ω]
X_V	reaktance vedení
$Z_{(0)}$	nulová zkratová impedance [Ω]
$Z_{(1)}$	sousledná zkratová impedance [Ω]
$Z_{(2)}$	zpětná zkratová impedance [Ω]
Z_k	zkratová impedance [Ω]
Z_T	impedance transformátoru [Ω]
zvn	zvláště vysoké napětí

Obsah

Úvod.....	1
1. Teoretický rozbor průmyslových rozvodů.....	2
1.1. Průmyslové rozvody.....	2
1.2. Elektrizační soustava.....	2
1.2.1. Požadavky na elektrizační soustavu.....	2
1.2.2. Složky elektrizační soustavy.....	3
1.3. Elektrické sítě.....	3
1.3.1. Základní typy elektrických sítí.....	3
1.4. Elektrické stanice.....	4
1.4.1. Základní rozdělení elektrických stanic.....	5
2. Teoretický rozbor zkratových jevů.....	6
2.1. Základní pojmy.....	6
2.2. Typy Zkratů.....	8
2.2.1. Jednofázový zkrat.....	8
2.2.2. Dvoufázový zkrat.....	9
2.2.3. Dvoufázový zemní zkrat.....	9
2.2.4. Trojfázový zkrat.....	9
2.3. Typy zkratů dle způsobu spojení vodivých částí.....	10
2.3.1. Dokonalý zkrat (kovový).....	10
2.3.2. Nedokonalý zkrat.....	10
2.3.2. Obloukový zkrat.....	10
2.4. Účinky zkratového proudu.....	10
2.5. Zkratové impedance v místě zkratu.....	10
2.5.1. Sousledná zkratová impedance $Z_{(1)}$ trojfázové střídavé soustavy.....	10
2.5.2. Zpětná zkratová impedance $Z_{(2)}$ trojfázové střídavé soustavy.....	10
2.5.3. Netočivá zkratová impedance $Z_{(0)}$ trojfázové střídavé soustavy.....	10
2.5.4. Zkratová impedance Z_k trojfázové střídavé soustavy.....	10
2.6. Zkratové impedance elektrických zařízení.....	11
2.6.1. Sousledná zkratová impedance $Z_{(1)}$ elektrického zařízení.....	11
2.6.2. Zpětná zkratová impedance $Z_{(2)}$ elektrického zařízení.....	11
2.6.3. Netočivá zkratová impedance $Z_{(0)}$ elektrického zařízení.....	11
3. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle EN 60909.....	12
3.1. Předpoklady výpočtu.....	12
3.2. Metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu.....	12
3.3. Metoda souměrných složek.....	12
3.4. Maximální zkratové proudy.....	13
3.5. Minimální zkratové proudy.....	13
3.6. Zkratové impedance elektrických zařízení soustavy.....	14
3.6.1. Síťové napáječe.....	14
3.6.2. Transformátory.....	15

3.6.3. Venkovní vedení a kabely	17
3.6.4. Reaktory omezující zkratový proud	17
3.6.5. Synchronní stroje.....	18
3.6.6. Asynchronní motory.....	19
3.6.7. Statické měniče	19
3.6.8. Kondenzátory a nemotorické zátěže.....	20
3.7. Výpočet zkratových proudů	20
3.7.2. Počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_k	21
3.7.3. Nárazový zkratový proud i_p	23
3.7.4. Stejnoseměrná složka zkratového proudu $i_{d.c.}$	24
3.7.5. Souměrný vypínací zkratový proud I_b	24
3.7.6. Ustálený zkratový proud I_k	25
3.7.8. Ekvivalentní oteplovací zkratový proud.....	26
4. Výpočet zkratových poměrů na rozvodnách průmyslového podniku	27
5. Posouzení zkratové odolnosti rozvoden.....	33
Závěr.....	34
Literatura.....	35

Úvod

Zkrat patří k nejzávažnějším a nejčastějším poruchám s jakými je možno se v rámci elektrizační soustavy setkat. Ke vzniku zkratu dochází úmyslným nebo nahodilým dotykem dvou vodivých částí. Zkratový proud může dosáhnout i několikanásobku hodnoty proudu jmenovitého a svými dynamickými a tepelnými účinky namáhá elektrický obvod. Jako ochrana před zkratovými proudy se nejčastěji používají pojistky a jističe. Ty velmi rychle a samočinně odpojí postiženou část od zdroje elektrické energie. I přes krátkou dobu vybavení ochran je elektrický obvod vystaven účinkům zkratového proudu, a proto je nutné dimenzovat obvod na zkratové poměry, které mohou v daném místě nastat.

Bakalářská práce se věnuje zkratovým poměrům a výpočtu zkratové odolnosti. Kapitola první je věnována průmyslovým rozvodům a druhům elektrických sítí. Druhá kapitola seznamuje se základními zkratovými pojmy, s typy zkratů a s průběhy zkratového proudu. Kapitola třetí čerpá z platné normy ČSN - EN 60909. Jsou zde uvedeny zjednodušující předpoklady výpočtu a metody pro výpočet zkratových proudů a zkratových impedancí jednotlivých zařízení elektrizační soustavy. Kapitola čtvrtá obsahuje podrobný výpočet, zkratové odolnosti jednotlivých rozveden průmyslového podniku, metodou poměrných jednotek.

1. Teoretický rozbor průmyslových rozvodů

1.1. Průmyslové rozvody

Rozvody elektrické energie v průmyslovém závodu jsou napájeny z veřejné rozvodné soustavy. Závody jsou připojeny na sítě různých napětí podle velikosti odebíraného výkonu.

Dělení průmyslových podniků dle odebíraného výkonu:

- Velké (s příkonem nad 50 MW) – jsou připojeny na sítě 110, popř. 220 kV
- Střední (15 – 50 MW) – 110 kV nebo sítě vn
- Malé (pod 15 MW) – vn v závislosti na konkrétních místních podmínkách

Elektrická energie může být přivedena jedním nebo více vedeními. Počet přívodů závisí na stupni důležitosti dodávky elektrické energie. Ta se přivádí do tzv. vstupní stanice (transformovny) závodu venkovním nebo kabelovým vedením. Vstupní stanice je zároveň místo, kde se odebíraná energie měří. Odtud potom energie putuje tzv. napájecím rozvodem, který napájí jednotlivé výrobní provozní soubory, v nichž je provozními rozvody provedeno propojení na jednotlivé spotřebiče. Průmyslové rozvody jsou zhotovovány zpravidla kabelovými vedeními. Někdy je v provozních rozvodech použit přípojnicový rozvod nízkého napětí.

Pro průmyslové rozvody se používají paprskové (obr. 1), okružní (obr. 3) nebo dvoupaprskové sítě, ze kterých jsou napájeny podružné transformovny vn/nn v jednotlivých provozních souborech. Provozní rozvody jsou tvořeny sítěmi paprskovými, průběžnými (obr.2), okružními nebo různě kombinovanými.

Řízení průmyslových rozvodů je soustředěno do technologické dozorny. Vzhledem k tomu, že tyto rozvody, zejména rozvody provozní, jsou úzce spjaty s výrobním zařízením. Proto bývají elektrické stanice, zvláště jejich sekundární rozvodná zařízení, obvykle vybaveny více a lépe, než je tomu u veřejných a rozvodných soustav. [1]

1.2. Elektrizační soustava

K přenosu elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby slouží elektrizační soustava. Taková soustava se obvykle skládá z přenosové a distribuční soustavy.

1.2.1. Požadavky na elektrizační soustavu

Mezi základní požadavky na elektrizační soustavu patří:

- Zajišťovat bezpečnost osob
- Zajišťovat dostatečnou, spolehlivou a kvalitní dodávku elektrické energie spotřebitelům
- Výrazně snižovat pracnost prací v provozu a v údržbě soustavy
- Pracovat s vysokou účinností
- Pracovat s vyššími parametry a s větším počtem zdrojů a elektrických stanic
- Využívat odpadního tepla
- Umožňovat řízení odběru elektrické energie
- Být materiálově nenáročná (zejména pokud jde o deficitní materiály)
- Zabraňovat nepříznivým vlivům soustavy na okolí (na životní prostředí) [1]

1.2.2. Složky elektrizační soustavy

Elektrizační soustava se skládá z těchto částí:

- Výrobní část (elektrárny všeho druhu)
- Přenosová soustava
- distribuční soustava
- Spotřebiče elektrické energie

Přenosovou soustavou přenášíme velké výkony mezi hlavními uzly elektrizační soustavy. Distribuční síť má za úkol dopravit elektrickou energii z napájeného uzlu až k místu spotřeby. [1]

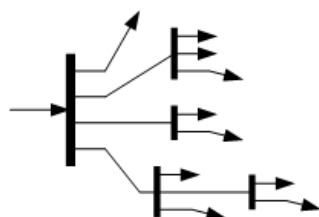
1.3. Elektrické sítě

Elektrickými sítěmi se rozumějí souhrny všech galvanicky spojených částí téhož napětí. Sítě jednotlivých napětových a proudových soustav jsou od sebe odděleny transformovkami nebo měnícími. [1]

1.3.1. Základní typy elektrických sítí

Paprsková (radiální)

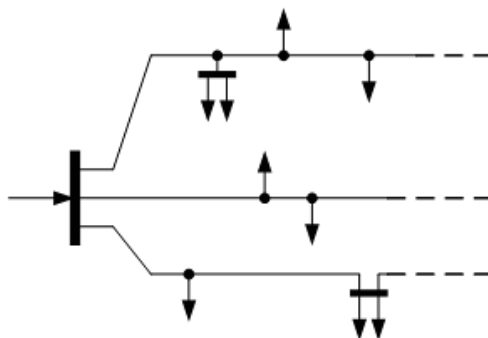
Paprsková síť je nejjednodušší a také nejlevnější variantou elektrických sítí, používá se pro distribuční rozvod nn nebo v menších celcích průmyslových závodů, kde nejsou spotřebiče prvního stupně důležitosti. Nevýhodou této sítě je menší spolehlivost. Každá porucha znamená vyřazení všech spotřebičů v daném paprsku. [1], [6]



Obr. 1 Příklad paprskové (radiální) sítě

Průběžná

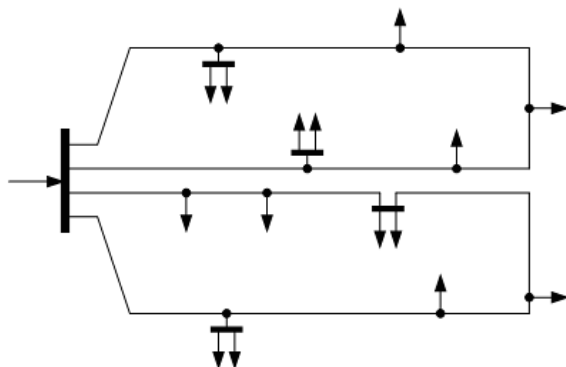
Tato elektrická síť je charakteristická pro osvětlení komunikací. Uplatňuje se však i pro napájení maloodběratelů, pro napájení větších a rozlehlějších hal s menšími spotřebiči nebo pro osvětlení velkých prostor. Provozní spolehlivost průběžné sítě je stejná jako u paprskového rozvodu.



Obr. 2 Příklad průběžné sítě

Okružní

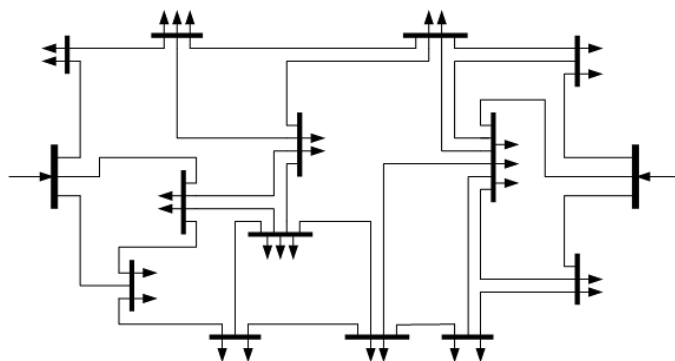
Okružní síť je provedena jako uzavřený kruh, ze kterého jsou napájeny jednotlivé paprskové odbočky ke spotřebičům nebo podružným rozváděčům. Hlavní výhodou této sítě je spolehlivost, spotřebiče jednoho rozvodu jsou napájeny ze dvou stran. Tímto je dosaženo větší spolehlivosti dodávky elektrické energie. Z těchto důvodů se síť uplatňuje hlavně ve větších průmyslových závodech a v obytných zástavbách.



Obr. 3 Příklad okružní sítě

Mřížová

V mřížové síti je každý podružný rozváděč napájen nejméně ze dvou nezávislých míst. Tento druh sítě může pokrývat i velké plochy s četnými odběry. Síť má vysokou provozní spolehlivost, která je však podmíněna vysokou pořizovací cenou. Mřížové sítě se používají hlavně pro napájení hustých městských zástaveb a rozsáhlých průmyslových závodů.



Obr. 4 Příklad mřížové sítě

1.4. Elektrické stanice

Elektrická stanice je ucelené zařízení uzlu elektrizační soustavy, slouží buď k transformaci elektrické energie a k jejímu rozvodu, nebo k rozvádění elektřiny téhož napětí nebo k přeměně elektrického proudu střídavého na proud o jiném kmitočtu nebo stejnosměrný a k jeho rozvádění. Jsou nedílnou součástí elektrizačních soustav. Propojují sítě různých proudových a napěťových soustav a přes ně je také možné jednotlivé sítě ovlivňovat navzájem. Stanice proto musí být řešeny tak, aby umožňovali všechny transfigurace soustavy, které umožňují připojené sítě. Proto je nutná správná volba umístění stanice v soustavě. Distribuční elektrické stanice by měly ležet pokud možno v centrech spotřeby. Význam každé elektrické stanice závisí na tom, v jakém místě je začleněna do elektrizační soustavy. Nejvyšší význam je přikládán uzlovým stanicím v přenosových soustavách. V rozvodných soustavách je význam elektrické stanice úměrný velikosti oblasti, která je touto stanicí zásobována. Stanice umístěny ve významných uzlech soustavy musí zaručit spolehlivější dodávku

elektrické energie než malé stanice, které napájí pouze malou část odběratelů. Různé spolehlivosti dodávky elektrické energie je možné dosáhnout vhodnou volbou druhu přenosových a rozvodných sítí a jejich různým propojením v elektrických stanicích. Se spolehlivostí elektrické stanice roste také její cena, je nutné tedy brát v úvahu i ekonomickou stránku věci a vybrat optimální řešení mezi spolehlivostí a náklady na výstavbu a provoz. [2], [1]

1.4.1. Základní rozdělení elektrických stanic

Aby byla elektrická stanice správně vyřešena a bylo ji tak možné zařadit do elektrizační soustavy je nutné, aby dokázala plnit všechny požadavky na ni kladené. Tyto stanice tvoří uzly elektrizační soustavy, do nichž je soustředěna většina funkcí soustavy, hlavně spínání, jištění, regulace, měření a ovládání. [1]

a) dle funkce:

- transformovny – slouží k rozvodu a transformaci elektrické energie
- spínací stanice – slouží k rozvodu elektrické energie téhož napětí
- měnirny – slouží ke změně frekvence napětí nebo ke změně střídavého napětí na stejnosměrné a naopak
- kompenzovny – slouží k regulaci parametrů přenosu za účelem vyrovnaní jalových složek střídavého proudu.

b) dle způsobu provozu:

- s trvalou obsluhou
- bez obsluhy s pravidelným dozorem
- bez obsluhy s dálkovým ovládáním

c) dle provedení:

- vnitřní (včetně zapouzdřených)
- venkovní
- polokryté

2. Teoretický rozbor zkratových jevů

Zkrat je nejrozšířenější poruchou v elektrizační soustavě. Vznikne vzájemným spojením dvou nebo tří fází. V soustavách s uzlem uzemněným může zkrat vzniknout také spojením dokrátka jedné nebo dvou fází se zemí resp. středním vodičem. Obvod mezi místem zkratu a napětovými zdroji nazýváme zkratovým obvodem. Působení zkratových proudů je sice krátkodobé, ale vzhledem k velikostem zkratových proudů mohou být jejich tepelné účinky nebezpečné pro mnohá elektrická zařízení. Při zkratu se také objevují velké mechanické síly, vznikající mezi vodiči, tyto síly mohou vést k poškození postiženého zařízení.

Mezi hlavní příčiny vzniku zkratu patří poruchy izolace, způsobené přepětím, přímým úderem blesku, zestárnutím izolačních materiálů, regulace elektrických strojů, přímé poškození venkovních vedení a kabelů, zapnutí a vypnutí článku soustavy, vznik místní nesymetrie.

Při zkratu v elektrizačních soustavách se mnohdy několika násobně zmenšuje impedance obvodu mezi místem zkratu a napětovými zdroji. Tímto vznikají vysoké proudy ve větvích a pokles napětí v uzlech, zvláště v uzlech elektricky blízkých zkratu. V místě zkratu obvykle vznikají přechodové odpory vzniklého oblouku a ostatních částí cesty poruchového proudu. Přesné určení velikosti těchto odporů, zvláště odporu oblouku, je velice obtížné. Proud protékající obloukem i délka oblouku se v průběhu zkratu neustále mění, tím pádem se mění i odpor oblouku. Proto při výpočtu zkratových proudů pro účely dimenzování elektrických zařízení přechodné odpory zanedbáváme. [4]

2.1. Základní pojmy

Zkrat: náhodné nebo úmyslné vodivé spojení dvou nebo více vodivých částí, jehož důsledkem je, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi má hodnotu blízkou nule.

Zkratový proud: nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě.

Předpokládaný zkratový proud: je proud, který protéká obvodem, pokud je zkrat nahrazen ideálním spojením s nulovou impedancí beze změny napájení.

Souměrný zkratový proud: efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' : efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' : pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' a jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$.

Stejnoseměrná (aperiodická) složka i_{dc} zkratového proudu: střední hodnota obalových křivek průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p : maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Souměrný zkratový vypínací proud I_b : efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

Ustálený zkratový proud I_k : efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodového jevu.

Záběrový proud I_{LR} : největší souměrný efektivní proud asynchronního motoru se zabrzděným rotorem, který je napájen jmenovitým napětím U_{rM} při jmenovitém kmitočtu.

Ekvivalentní elektrický obvod: model složený ze sítě ideálních prvků, který slouží k popisu chování obvodu.

Jmenovité napětí sítě: sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

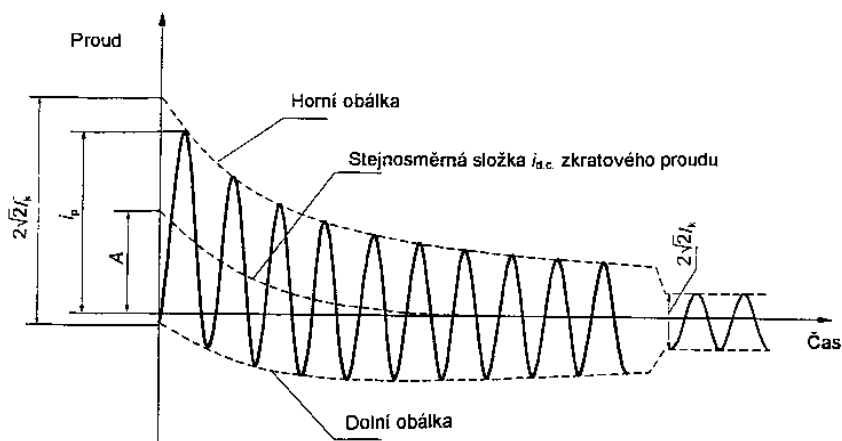
Napětí ekvivalentního zdroje $cU_n/\sqrt{3}$: napětí ideálního zdroje přiloženého v místě zkratu v sousledné složkové soustavě.

Napěťový součinitel c : poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Minimální doba vypnutí t_{min} : nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} : efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

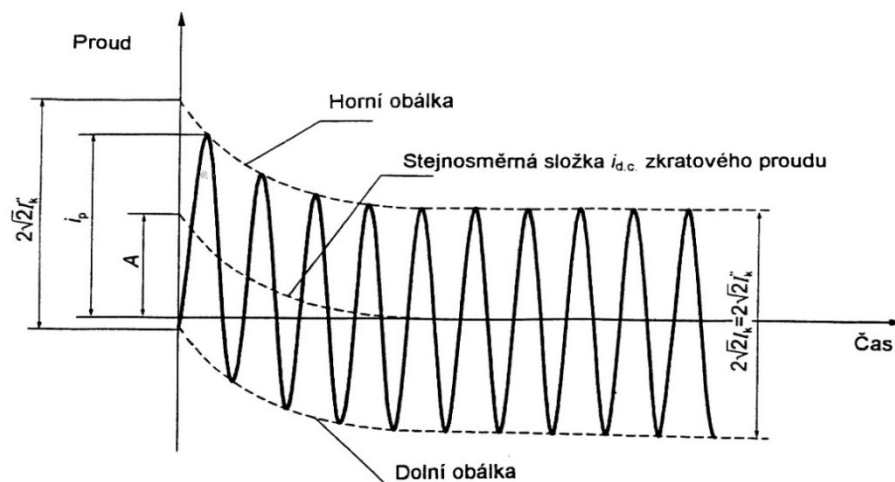
Elektricky blízký zkrat: zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' .



Obr. 5 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou (schematický diagram)

- I_k'' počáteční souměrný rázový zkratový proud
- i_p nárazový zkratový proud
- I_k ustálený zkratový proud
- $i_{d.c.}$ stejnosměrná složka zkratového proudu
- A počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$

Elektricky vzdálený zkrat: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.



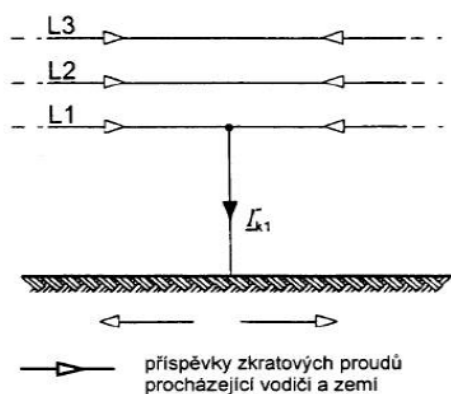
Obr. 6 Zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou (schematický diagram)

- I_k'' počáteční souměrný rázový zkratový proud
- i_p nárazový zkratový proud
- I_k ustálený zkratový proud
- $i_{d.c.}$ stejnosměrná složka zkratového proudu
- A počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$

2.2. Typy Zkratů

2.2.1. Jednofázový zkrat

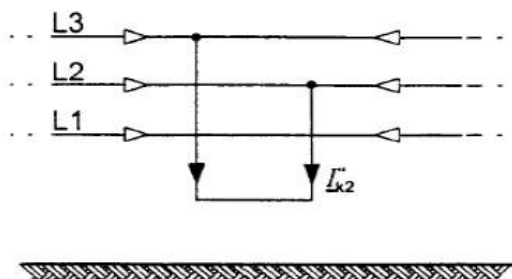
Jednofázový zkrat nastává při spojení jedné z fází se středním vodičem, pouze pokud jde o soustavu se středním vodičem. Nebo při spojení jedné z fází se zemí



Obr. 7 Jednofázový zkrat

2.2.2. Dvoufázový zkrat

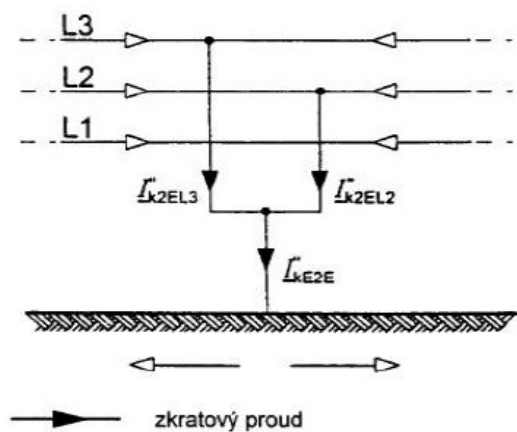
Dvoufázový zkrat nastane, pokud dojde k doteku dvou libovolných fází.



Obr. 8 Dvoufázový zkrat

2.2.3. Dvoufázový zemní zkrat

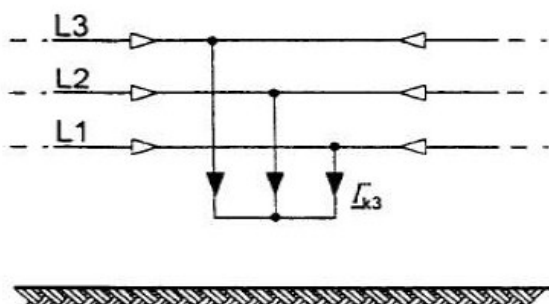
Dvoufázový zemní zkrat nastane, pokud jsou současně spojené dvě fáze spojené se zemí.



Obr. 9 Dvoufázový zemní zkrat

2.2.4. Trojfázový zkrat

Trojfázový zkrat nastane při vzájemném doteku všech tří fází v jednom místě.



Obr. 10 Trojfázový zkrat

2.3. Typy zkratů dle způsobu spojení vodivých částí

2.3.1. Dokonalý zkrat (kovový)

O dokonalý zkrat se jedná tehdy, je-li impedance v místě styku fází nebo fází a země, rovna nebo se blíží nule.

2.3.2. Nedokonalý zkrat

vznikne nedokonalým spojením vodivých částí různého potenciálu. Impedance spojení je poměrně vysoká a ovlivňuje velikost zkratového proudu.

2.3.2. Obloukový zkrat

nastane v případě, kdy se dva vodiče přiblíží na tolik, že mezi nimi dojde k průrazu prostředí a zapálí se oblouk.

2.4. Účinky zkratového proudu

V elektrizačních zařízeních se zkraty projevují působením vysokých zkratových proudů a mnohými nepříznivými účinky, které ohrožují bezpečnost provozu, zařízení a vážně ohrožují i bezpečnost obsluhy elektrických zařízení. Ohrožení bezpečnosti může být způsobeno:

- Přímým zkratovým proudem (silové, tepelné a indukční účinky)
- Poklesem napětí ve zkratovém obvodu (působí na spotřebiče a ohrožuje stabilitu rozvodné soustavy)
- Elektrickým obloukem (pokud se jedná o zkrat obloukový)

Hluboké poklesy napětí vznikající při zkratech mohou působit rušivě na chod mnoha elektrických spotřebičů. Mohou zapříčinit narušení stability paralelního chodu alternátorů a tím ohrozit provoz celé elektrizační soustavy.

Při zemních zkratech mohou vzniknout nebezpečné vlivy působící na paralelní komunikaci vedení i na zařízení uložená v zemi. Zemní spojení jsou nebezpečná zejména pro izolaci vodičů, protože při něm se na vodiči místo fázového napětí objevuje napětí sdružené a napětí nulového uzlu transformátoru vzrůstá na velikost fázového napětí. Pokud jde o přerušované zemní spojení, pak se napětí namáhání izolace několikanásobně zvětšuje. [4]

2.5. Zkratové impedance v místě zkratu

2.5.1. Sousedná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ trojfázové střídavé soustavy

Impedance sousledné složky viděná z místa zkratu.

2.5.2. Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ trojfázové střídavé soustavy

Impedance zpětné složky viděná y místa zkratu.

2.5.3. Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ trojfázové střídavé soustavy

Impedance netočivé složkové soustavy viděná z místa zkratu. Zahrnuje trojnásobek impedance \underline{Z}_N mezi uzlem transformátoru a zemí.

2.5.4. Zkratová impedance \underline{Z}_k trojfázové střídavé soustavy

Zkrácené označení pro souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ pro výpočet proudů při trojfázovém zkratu.

2.6. Zkratové impedance elektrických zařízení

2.6.1. Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ elektrického zařízení

Poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné sousledné složkové soustavy napětí.

2.6.2. Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ elektrického zařízení

Poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné zpětné složkové soustavy napětí.

2.6.3. Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ elektrického zařízení

Poměr napětí proti zemi a zkratového proudu jedné fáze elektrického zařízení při napájení ze střídavého napětíového zdroje, přičemž tři paralelní fázové vodiče jsou použity pro proud vycházející ze zdroje a čtvrtý vodič nebo zem tvoří společné zpětné vedení.

3. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle EN 60909

Kompletní výpočet zkratových proudů určuje proudy jako funkce času v místě zkratu od počátku zkratu až do jeho konce. Zkratové proudy odpovídají okamžité hodnotě napětí na počátku zkratu (viz Obr. 5 a 6). Ve většině praktických případů takovýto výpočet není nutný. [3]

3.1. Předpoklady výpočtu

Pro výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vycházíme z následujících zjednodušení:

- Typ zkratu zůstává stejný po celou dobu trvání zkratového proudu, tzn. zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu trvání zkratu zkratem mezi fází a zemí
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány kromě paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Přestože tyto předpoklady výpočtu elektrické soustavy neodpovídají zcela přesně dané skutečnosti, zajišťují dostatečnou přesnost výsledků.

3.2. Metoda ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu

Tato výpočetní metoda je založena na zavedení ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu. Veškeré síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny pouze svou vnitřní impedancí. Ekvivalentní napětový zdroj je jediným aktivním napětím v soustavě.

Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě zkratu použije ekvivalentní napětový zdroj. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů, atd. jsou postradatelné, odpadá nutnost provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem.

3.3. Metoda souměrných složek

Použitím souměrných složek se zjednoduší výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech. Předpokládá se, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných vedení. Takto vypočtené hodnoty proudů mají přijatelnou přesnost i pro netransponované vedení. Při použití této metody se vypočítá proud v každé fázi superponováním tří souměrných složkových soustav. Proud sousledné složky soustavy, proud zpětné složky soustavy, proud netočivé složky soustavy.

Souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ určíme, když souměrnou soustavu napětí sousledné složky přiložíme do místa zkratu, všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřní impedancí.

Zpětnou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(2)}$ určíme, když souměrnou soustavu napětí zpětné složky přiložíme do místa zkratu.

Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou lišit jen u točivých strojů. Při výpočtu elektricky vzdálených zkratů se může uvažovat $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$

Netočivou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(0)}$ určíme přiložením střídavého napětí mezi tři zkratované fáze a společné zpětné vedení. (např. zemnicí soustava, vodič PEN, zemnicí vodič)

Při výpočtu nesouměrných zkratů v soustavách vysokého a velmi vysokého napětí s použitím ekvivalentního napěťového zdroje se musí uvažovat kapacita netočivé složky vedení u soustav s izolovaným uzlem, rezonančně uzemněných, a u soustav s uzemněným uzlem se zemnicím faktorem vyšším než 1,4. Zanedbáním netočivé složky kapacit vedení v uzemněných soustavách vedou hodnoty zkratových proudů k výsledkům, které jsou mírně vyšší než skutečné hodnoty zkratových proudů. Odchylka je závislá na uspořádání sítě. Jen ve zvláštních případech je netočivá složka impedance v místě zkratu stejná jako sousledná a zpětná impedance.

3.4. Maximální zkratové proudy

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné vycházet z nejnepríznivějšího stavu elektrizační soustavy.

- Pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\max} podle tabulky 1.
- Vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- Vliv asynchronních motorů se musí uvážit podle potřeby, ale v souladu s 2.6.1.
- Uvažují se odpory R_L vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C.

3.5. Minimální zkratové proudy

Při výpočtu minimálních zkratových proudů volíme následující podmínky:

- Pro výpočet se musí použít napěťový součinitel c_{\min} podle tabulky 1.
- Vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální velikosti zkratového proudu.
- U stanic, které jsou za normálního provozu napájené dvěma transformátory nebo dvěma vedeními, se minimální zkratové proudy určí při odpojení jednoho transformátoru nebo vedení.
- Vliv asynchronních motorů se zanedbává.
- Odpor R_L venkovního vedení nebo kabelů se musí uvažovat při nejvyšší teplotě

$$R_L = [1 + \alpha(\theta_e - 20^\circ\text{C})]R_{L20} \quad (1)$$

kde:

R_{L20} rezistence při teplotě 20°C

θ_e teplota vodiče ve °C na konci zkratu (uvažuje se maximální dovolená provozní teplota vodičů).

α součinitel rovný 0,004/K, platný pro praktické účely pro měď, hliník, slitiny hliníku.

Jmenovité napětí U_N	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $c_{\max}^{1)}$	minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100V až 1000V	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí ²⁾ >1kV až 35kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí >35kV		

1) $c_{\max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.

2) Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{\max}U_n = U_m$ nebo $c_{\min}U_n = 0,9 \times U_m$

3) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6%.

4) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10%.

Tab. 1 Napěťový součinitel c

3.6. Zkratové impedance elektrických zařízení soustavy

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobných zařízení je sousledná impedance rovna zpětné zkratové impedanci

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} \quad (2)$$

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)}/I_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a zpětným vodičem např. (nulovým vodičem, zemnicím vodičem, zemí...). V tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky. Impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli K_G, K_T , pokud se zkratové proudy počítají metodou ekvivalentního zdroje v místě zkratu. [4]

3.6.1. Síťové napáječe

Je-li trojfázový zkrat, u kterého je znám počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} v místě připojení napáječe Q, pak ekvivalentní impedance Z_Q - sousledná zkratová impedance sítě v bodě připojení napáječe Q se určí:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \quad (3)$$

V případě kdy je zkrat napájen transformátorem ze sítě VN nebo VVN u kterého je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} nebo souměrný rázový zkratový výkon S''_{kQ} v místě napojení napáječe Q, lze ekvivalentní zkratovou impedanci Z_{Qt} vztaženou ke straně nižšího napětí transformátoru určit takto:

$$Z_{Qt} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (4)$$

Kde:

U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q

I''_{kQ} je počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q

c je napěťový součinitel (dle tabulky 1) napětí U_{nQ}

t_r je jmenovitý převod transformátoru (přepínač v základní poloze)

V případě napáječů, napájených venkovním vedením s jmenovitým napětím nad 35kV je možné ekvivalentní impedanci Z_Q považovat za reaktanci (činná složka impedance Z_Q je nulová). V jiných případech, pokud není pro činné odpory R_Q síťových napáječů známa žádná přesná hodnota, je možné dosadit $R_Q = 0,1 X_Q$ kde $X_Q = 0,995 Z_Q$.

Minimální a maximální hodnotu počátečního souměrného rázového zkratového proud I''_{kQ} nebo souměrný rázový zkratový výkon S''_{kQ} na straně vyššího napětí musí udat provozovatel soustavy nebo se musí určit výpočtem dle normy 60909.

Ve zvláštních případech, v závislosti na konfiguraci vinutí a uzemnění uzlu transformátoru, můžeme uvažovat také netočivou zkratovou impedanci síťových napáječů soustavy.

3.6.2. Transformátory

Dvouvinuťové transformátory

Sousledné zkratové impedance dvouvinuťových transformátorů $Z_T = R_T + jX_T$ s odbočkami regulovatelnými při zatížení nebo bez nich se mohou vypočítat ze štítkových údajů transformátoru pomocí vztahů:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (5)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (6)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (7)$$

kde:

U_{rT} jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí

I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí

S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

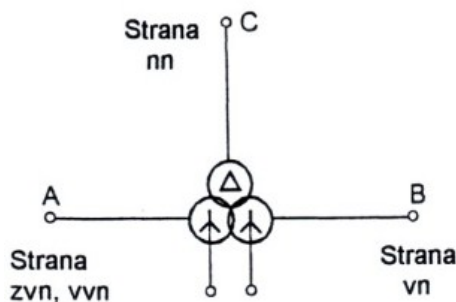
P_{krT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru

u_{kr} je jmenovité napětí nakrátko transformátoru v procentech

u_{Rr} je činná složka u_{kr} v procentech

Poměr složek Sousedné zkratové impedance R_T/X_T se zvětšuje s velikostí transformátoru. U velkých transformátorů je činná složka tak malá, že je možné při výpočtu zkratového proudu ji zcela zanedbat a uvažovat pouze reaktanci transformátoru X_T . Odpor je nutné uvažovat pouze tehdy pokud počítáme velikost nárazového zkratového proudu i_p nebo velikost stejnosměrné složky $i_{d.c.}$.

Trojvinuťové transformátory



Obr. 13 Trojvinuťový transformátor – označení zapojení vinutí

Sousedné zkratové impedance \underline{Z}_A , \underline{Z}_B , \underline{Z}_C trojvinuťových transformátorů lze vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztahených na stranu A transformátoru):

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100} + j \frac{u_{XrAB}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojená}) \quad (8a)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100} + j \frac{u_{XrAC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojená}) \quad (8b)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100} + j \frac{u_{XrBC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojená}) \quad (8d)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (9)$$

pomocí vzorců:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (10a)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (10b)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (10c)$$

kde:

U_{rTA}	jmenovité napětí na straně A
S_{rTAB}	jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A, B
S_{rTAC}	jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A, C
S_{rTBC}	jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B, C
u_{RrAC} , u_{XrAC}	jmenovité činné a induktivní složky napětí na krátko mezi stranami A, C, uvedené v procentech
u_{RrBC} , u_{XrBC}	jmenovité činné a induktivní složky napětí na krátko mezi stranami B, C, uvedené v procentech

3.6.3. Venkovní vedení a kabely

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ závisí zejména na průřezu a roztečích vodičů. Souslednou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ a netočivou impedanci $\underline{Z}_{(0)}$ je možné měřit. Netočivé impedance mohou být zadány v poměru: $R_{(0)L}/R_L$ a $X_{(0)L}/X_L$

Činný odpor vedení na jednotku délky

Činný odpor vedení je závislý na vodivém materiálu vedení. Odpor vedení je přímo úměrný měrnému odporu vedení (rezistivitě) ρ a nepřímo úměrný průřezu vedení S

$$R_L = \frac{\rho}{S} \quad (11)$$

Reaktanci venkovního vedení na jednotku délky

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (12)$$

kde:

d geometrická střední vzdálenost mezi vodiči $d = \sqrt[3]{d_{L_1L_2} \cdot d_{L_2L_3} \cdot d_{L_3L_1}}$

r poloměr vodiče, v případě svazkových vodičů se za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, kde R je poloměr svazkového vodiče

n počet vodičů ve svazku

μ_0 $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$

Pro kabely je sousledná impedance uvedena ve výrobní dokumentaci. Impedance netočivé složky závisí na provedení kabelu, způsobu uzemnění a vlivu okolí.

3.6.4. Reaktory omezující zkratový proud

Za předpokladu geometrické souměrnosti reaktoru jsou si sousledné, zpětné a netočivé zkratové impedance rovny. Reaktory omezující zkratový proud jsou považovány za součást zkratové impedance.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{rR}} \quad \text{a } R_R \ll X_R \quad (13)$$

kde:

u_{kR}, I_{rR} štiťkové hodnoty reaktoru

U_n jmenovité napětí soustavy.

3.6.5. Synchronní stroje

Synchronní generátory

Při výpočtu počátečních souměrných zkratových proudů v soustavách, napájených přímo z generátoru bez blokových transformátorů, je třeba použít v sousledné složkové soustavě tuto impedanci:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (14)$$

kde:

c_{max} napěťový součinitel podle tab. 1

U_n jmenovité napětí soustavy

U_{rG} jmenovité napětí generátoru

\underline{Z}_G rázová impedance generátoru v sousledné soustavě: $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$

\underline{Z}_{KG} korigovaná impedance generátoru

φ_{rG} fázový úhel mezi I_{rG} a $U_{rG}/\sqrt{3}$

x_d'' poměrná hodnota rázové reaktance generátoru vztažená k jmenovité impedanci: $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ kde $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$

S dostatečnou přesností lze použít následující hodnoty fiktivní rezistance:

$R_{Gf} = 0,05X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1kV$ a $S_{rG} \geq 100MVA$

$R_{Gf} = 0,07X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1kV$ a $S_{rG} < 100MVA$

$R_{Gf} = 0,15X_d''$ pro generátory s $U_{rG} < 1kV$

Součinitelé 0,05; 0,07 a 0,15 respektují zanikání střídavé složky a zanikání stejnosměrné složky zkratového proudu v průběhu první půlperrody po vzniku zkratu. Součinitelé ale nerespektují vliv různých teplot vinutí na R_{Gf} .

Hodnoty R_{Gf} se mohou použít pro výpočet nárazového zkratového proudu, nemohou se použít při výpočtu aperiodické složky zkratového proudu $i_{d.C.}$. Pro výpočet $i_{d.C.}$, se musí použít hodnoty R_G od výrobce.

Synchronní motory a kompenzátory

Při výpočtu počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , nárazového zkratového proudu i_p , souměrného zkratového vypínacího proudu I_b a ustáleného zkratového proudu I_k je možné modelovat synchronní kompenzátor stejně jako synchronní generátor. Má-li synchronní motor napěťovou regulaci, je uvažován jako synchronní generátor.

3.6.6. Asynchronní motory

Příspěvek motorů vn je nutné zahrnout do výpočtu maximálního zkratového proudu. Příspěvek motorů nn se musí zahrnout do výpočtu ve vlastní spotřebě elektráren v průmyslových podnicích. Motory přispívají k velikosti:

- Počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_k
- Nárazového zkratového proudu i_p
- Souměrného zkratového vypínacího proudu I_b
- Ustáleného zkratového proudu I_k (pouze u nesouměrných zkratů)

Příspěvek asynchronních motorů soustavě nízkého napětí ke zkratovému proudu I''_k se může zanedbat, pokud tento příspěvek není větší než 5% počátečního zkratového proudu I''_{kM} , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I''_{kM} \quad (15)$$

kde:

$\sum I_{rM}$ součet všech jmenovitých proudů motorů připojených přímo do sítě postižené zkratem
 I''_{kM} počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu motorů

Při výpočtu zkratových proudů je možné zanedbat motory vn a nn, které nejsou zároveň v provozu. Určení impedance Z_M motorů v sousledné a zpětné složkové soustavě:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR} // I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (16)$$

kde:

U_{rM} jmenovité napětí motoru
 I_{rM} jmenovitý proud motoru
 S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru
 $I_{LR} // I_{rM}$ poměr záběrného proudu k jmenovitému proudu motoru

Motory nn se obvykle připojují k přípojnici pomocí kabelů různých délek a průřezů. Pro zjednodušení výpočtu můžeme skupiny motorů včetně jejich napájecích kabelů zahrnout do jediného ekvivalentního motoru.

3.6.7. Statické měniče

Pohony napájené ze statického měniče uvažujeme pouze v případě trojfázového zkratu. Pokud statické měniče umožňují zpětný přenos energie vzniklé při brzdění (tzv. rekuperace) v době zkratu. Pak přispívají pouze k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I''_k a nárazovému zkratovému proudu i_p . Nemají vliv na velikost souměrného vypínacího zkratového proudu I_b a ustáleného zkratového proudu I_k .

Z těchto důvodů zahrnujeme statické měniče do výpočtu zkratových proudů stejným způsobem jako asynchronní motory.

Z_M impedance jako u rovnice asynchronního motoru

U_{rM} jmenovité napětí transformátoru statického měniče na straně sítě

I_{rM} jmenovitý proud transformátoru statického měniče na straně sítě

$I_{LR}/I_{rM} = 3$

$R_M/X_M=0,1$; $X_M = 0,995 Z_M$

3.6.8. Kondenzátory a nemotorické zátěže

Dle výpočetních metod normy je možné při výpočtu zanedbat kapacity vedení, paralelní admitance a nerotační zátěže, mimo netočivé soustavy.

Při výpočtu nárazových zkratových proudů může být zanedbán vybíjecí proud paralelních kondenzátorů bez ohledu na čas vzniku zkratu.

Účinek sériových kondenzátorů lze při výpočtu zkratových proudů zanedbat, jestliže jsou vybaveny paralelním zařízením na omezování napětí, působící při zkratu.

V případě vysokonapěťových stejnosměrných přenosových soustav je nutné uvažovat kondenzátory a filtry, pokud se počítají střídavé zkratové proudy.

3.7. Výpočet zkratových proudů

Při výpočtu zkratových proudů rozeznáváme elektricky vzdálený a elektricky blízký zkrat. U elektricky vzdáleného zkratu uvažujeme pouze střídavé složky s konstantní amplitudou po celou dobu zkratu a stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A klesající k nule. U elektricky blízkého zkratu uvažujeme střídavé složky zmenšující se s amplitudou v průběhu zkratu a stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A klesající směrem k nule.

V případě zkratu elektricky blízkého motoru nebo generátoru je třeba určit nejen počáteční souměrný zkratový proud I''_k a nárazový zkratový proud i_p , ale též souměrný zkratový vypínací proud I_b a ustálený zkratový proud I_k . Obrázek 5 znázorňuje chování elektricky blízkého zkratu. V některých zvláštních případech může okamžitá hodnota klesajícího zkratového proudu dosáhnout nuly až po několika periodách od chvíle, kdy došlo ke zkratu. Tento případ nastane, pokud je stejnosměrná časová konstanta synchronního stroje větší než rázová časová konstanta. S tímto jevem norma 60909 - 0 nepočítá.

Pokud k ochraně rozvodného zařízení slouží pojistky a jističe omezující proud, je nutné nejdříve spočítat počáteční souměrný rázový zkratový proud bez pojistek a jističů. Z vypočítaného počátečního zkratového proudu a omezovacích charakteristik pojistek a jističů se určí omezený zkratový proud, který je největším zkratovým proudem namáhající rozvodné zařízení za jisticím prvkem.

Zkraty mohou mít jeden nebo více zdrojů. Nejjednodušší pro výpočet jsou trojfázové souměrné zkraty v radiálních sítích, pro které mohou být stanoveny jednotlivé příspěvky z každého zdroje.

3.7.2. Počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_k

Pokud je $Z_{(0)}$ větší než $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ nastane největší počáteční zkratový proud u trojfázového zkratu. Pokud dojde ke zkratu v blízkosti transformátoru s nízkou netočivou impedancí může se stát, že $Z_{(0)}$ je menší než $Z_{(1)}$. V takovémto případě se nejvyšší počáteční zkratový proud objeví u dvoufázového zemního zkratu.

Trojfázový zkrat

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_k se vypočítá obecně podle rovnice (17) z napětí ekvivalentního napěťového zdroje $cU_n/\sqrt{3}$ v místě zkratu a zkratové impedance $Z_k = R_k + jX_k$.

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (17)$$

V místě zkratu je zaveden ekvivalentní zdroj napětí $cU_n/\sqrt{3}$. Součinitel c vezmeme z tabulky 1.

Jednoduchý trojfázový zkrat

U vzdáleného zkratu napájeného z jednoho zdroje proud vypočítáme podle rovnice (17) s použitím těchto hodnot.

$$R_k = R_{Qt} + R_{TK} + R_L \quad (18a)$$

$$X_k = X_{Qt} + X_{TK} + X_L \quad (18b)$$

Kde:

R_k a X_k součet sériově zapojených rezistencí a reaktancí sousledné soustavy. Při výpočtu maximálních zkratových proudů je R_L rezistence vedení při teplotě 20°C

Zkraty napájené z nezaúhlené sítě

V případě kdy ke zkratovému proudu přispívá více radiálně připojených zdrojů, je počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_k v místě zkratu součtem všech proudů v jednotlivých větvích. Zkratový proud v každé větvi lze vypočítat jako nezávislý zdroj trojfázového zkratového proudu podle rovnice (17). Počáteční souměrný rázový zkratový proud v místě zkratu je vektorový součet jednotlivých příspěvků zkratových proudů.

Dvoufázový zkrat

Počáteční rázový zkratový proud vypočítáme v případě dvoufázového zkratu následovně:

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_k \quad (19)$$

V počátku zkratu je zpětná impedance přibližně rovna sousledné impedanci nezávisle na tom, zda jde o elektricky blízký nebo vzdálený zkrat. Proto můžeme zavést $Z_{(1)} = Z_{(2)}$. V případě elektricky blízkého zkratu se mohou impedance $Z_{(1)}$ a $Z_{(2)}$ lišit.

Dvoufázový zemní zkrat

Při výpočtu souměrných rázových zkratových proudů rozlišujeme tyto proudy: I''_{k2EL2} , I''_{k2EL3} a I''_{kE2E} . Pro přehlednost jsou tyto proudy vyznačeny v obrázku 9.

Pro vzdálené zkraty platí: $\underline{Z}_{(2)}$ je přibližně rovno $\underline{Z}_{(1)}$. Pokud je v tomto případě $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)}$, proud \dot{I}_{kE2E}'' při mezifázovém zkratu se zemním spojením je největší ze všech počátečních souměrných rázových zkratových proudů \dot{I}_k'' , \dot{I}_{k2}'' , \dot{I}_{k2E}'' a \dot{I}_{k1}'' .

$$\dot{I}_{k2EL2}'' = -jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a} \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \underline{Z}_{(0)}} \quad (20a)$$

$$\dot{I}_{k2EL3}'' = jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a}^2 \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \underline{Z}_{(0)}} \quad (20b)$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud \dot{I}_{kE2E}'' , který prochází zpětným vedením:

$$\dot{I}_{kE2E}'' = - \frac{\sqrt{3}cU_n \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \underline{Z}_{(0)}} \quad (20c)$$

U vzdáleného zkratu, kde $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, dostaneme velikosti zkratových proudů:

$$\dot{I}_{k2EL2}'' = cU_n \frac{\left| \frac{\underline{Z}_{(0)}}{\underline{Z}_{(1)}} - \underline{a} \right|}{\left| \underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (21a)$$

$$\dot{I}_{k2EL3}'' = cU_n \frac{\left| \frac{\underline{Z}_{(0)}}{\underline{Z}_{(1)}} - \underline{a}^2 \right|}{\left| \underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (21b)$$

$$\dot{I}_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} cU_n}{\left| \underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (21c)$$

Jednofázový zkrat

Při jednofázovém zkratu vypočítáme počáteční rázový zkratový proud následovně:

$$\dot{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (22)$$

Pro elektricky vzdálený zkrat kde $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$:

$$\dot{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\left| 2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (23)$$

3.7.3. Nárazový zkratový proud i_p

Trojfázový zkrat

Zkrat v nezauzlené síti

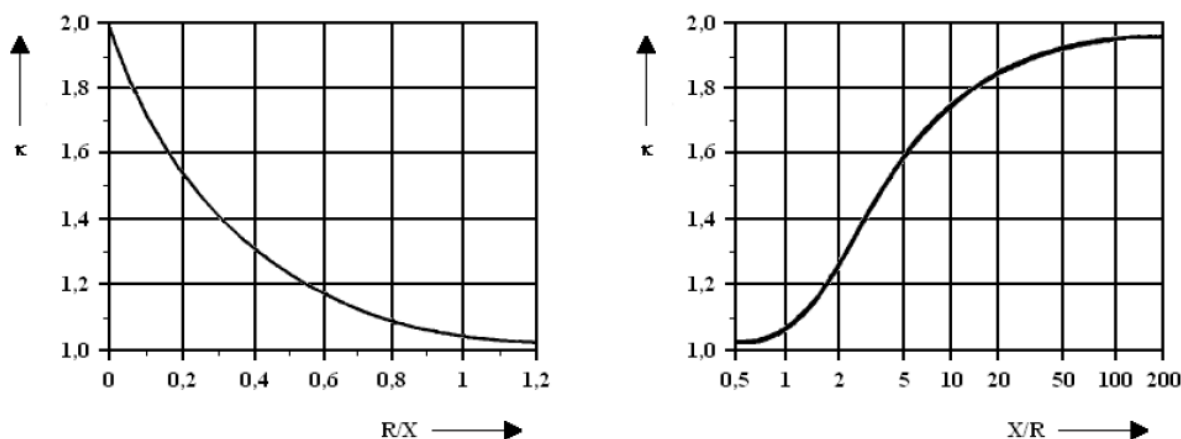
U trojfázového zkratu napájeného z nezauzlené sítě můžeme příspěvek nárazového zkratového proudu z každé větve vyjádřit takto:

$$i_p = k\sqrt{2}I_k'' \quad (24)$$

Součinitel k pro poměr R/X je nutno určit z obrázku 15 nebo určit pomocí vztahu:

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3 R/X} \quad (25)$$

Rovnice předpokládají vznik zkratu v okamžiku, kdy napětí prochází nulou.



Obr. 15 Součinitel k pro sériové obvody jako funkce R/X a X/R

Dvoufázový zkrat

Nárazový zkratový proud pro dvoufázový zkrat vypočítáme dle vztahu:

$$i_{p2} = k\sqrt{2}I_{k2}'' \quad (26)$$

Součinitel k vypočítáme stejně jako v případě trojfázového zkratu v závislosti na konfiguraci sítě. Pro zjednodušení norma umožňuje použít stejné hodnoty součinitele k jako pro trojfázový zkrat.

Dvoufázový zemní zkrat

Nárazový zkratový proud pro dvoufázový zemní zkrat vypočítáme dle vztahu:

$$i_{p2E} = k\sqrt{2}I_{k2E}'' \quad (27)$$

Součinitel k vypočítáme stejně jako v případě trojfázového zkratu v závislosti na konfiguraci sítě. Pro zjednodušení norma umožňuje použít stejné hodnoty součinitele k jako pro trojfázový zkrat.

i_{p2E} počítáme pouze v případě, že $\underline{Z}_{(0)} < \frac{1}{4}\underline{Z}_{(1)}$.

Jednofázový zkrat

Nárazový zkratový proud pro dvoufázový zemní zkrat vypočítáme dle vztahu:

$$i_{p1} = k\sqrt{2} I''_{k1} \quad (28)$$

Součinitel k vypočítáme stejně jako v případě trojfázového zkratu v závislosti na konfiguraci sítě. Pro zjednodušení norma umožňuje použít stejné hodnoty součinitele k jako pro trojfázový zkrat.

3.7.4. Stejnosemnná složka zkratového proudu $i_{d.c.}$

Pokud v okamžiku vzniku zkratu prochází napětí nulou, vznikne maximální stejnosměnná složka zkratového proudu. Naopak pokud je napětí v okamžiku vzniku zkratu maximální, pak se stejnosměnná složka neobjeví.

Stejnosemnnou složku vypočítáme dle vztahu:

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi f t R/X} \quad (29)$$

Kde:

I''_k počáteční souměrný rázový zkratový proud

f jmenovitý kmitočet

t čas ve kterém určujeme velikost stejnosměnné složky

3.7.5. Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Vypínací zkratový proud v místě zkratu se skládá ze symetrického zkratového proudu I_b a stejnosměnné složky $i_{d.c.}$ v čase t_{min} .

Vzdálený zkrat

U vzdálených zkratů jsou zkratové souměrné vypínací proudy rovny počátečním rázovým zkratovým proudům:

$$I_b = I''_k \quad (30a)$$

$$I_{b2} = I''_{k2} \quad (30b)$$

$$I_{b2E} = I''_{k2E} \quad (30c)$$

$$I_{b1} = I''_{k1} \quad (30d)$$

Blízký zkrat

V případě jednoduchého napájení zkratu u nezaizolovaných sítí se zmenšování souměrného zkratového vypínacího proudu zohledňuje pomocí součinitele μ . Součinitel μ závisí na minimální době vypnutí t_{min} a poměru I''_{kG} / I_{rG} , kde I_{rG} je jmenovitý proud generátoru.

$$I_b = \mu I''_k \quad (31)$$

Hodnoty součinitele μ určíme podle následujících rovnic:

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26 \frac{I''_k}{I_{rG}}} \text{ pro vypínací čas } t_{min}=0,02s \quad (32a)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51e^{-0,30 \frac{I''_k}{I_{rG}}} \text{ pro vypínací čas } t_{min}=0,05s \quad (32b)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \frac{I''_k}{I_{rG}}} \text{ pro vypínací čas } t_{min}=0,1s \quad (32c)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,38 \frac{I''_k}{I_{rG}}} \text{ pro vypínací čas } t_{min} \geq 0,25s \quad (32d)$$

Pokud I''_{kG}/I_{rG} není větší než 2, je $\mu=1$

Nesouměrné zkraty

Při nesouměrných zkratových proudech se nebere v úvahu pokles magnetického toku v generátoru a použijí se rovnice (30b) až (30d)

3.7.6. Ustálený zkratový proud I_k

Maximální ustálený zkratový proud

Synchronní stroje se závislými statickými budiči nepřispívají k ustálenému zkratovému proudu v případě zkratu na svorkách stroje. Přispívají pouze v případě, je-li určitá impedance mezi těmito svorkami a místem zkratu. Při výpočtu maximálního ustáleného zkratového proudu uvažujeme maximální buzení synchronního generátoru.

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \quad (33)$$

Velikost součinitele λ_{max} udává norma 60909-0, přičemž velikost součinitele λ_{max} závisí na konstrukci stroje a na trojfázovém zkratovém poměru I''_{kG} / I_{rG} .

Minimální ustálený zkratový proud

Při výpočtu minimálního ustáleného zkratového proudu v případě jednoduchého zkratu z jednoho generátoru nebo jednoho elektrárenského bloku uvažujeme konstantní buzení nezátíženého synchronního stroje.

$$I_{kmin} = \lambda_{min} I_{rG} \quad (34)$$

Velikost součinitele λ_{min} udává norma 60909-0, přičemž velikost součinitele λ_{min} závisí na konstrukci stroje a na trojfázovém zkratovém poměru I'_{kG} / I_{rG} . Pro výpočet minimálního ustáleného zkratového proudu v případě blízkého zkratu napájeného z jednoho nebo více podobných a paralelně pracujících generátorů s kompaktním buzením:

$$I_{kmin} = \frac{c_{min} U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (35)$$

3.7.8. Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Během zkratu jsou zařízení elektrizační soustavy tepelně namáhány. Tepelné zatížení závisí na době trvání zkratu a na průběhu zkratového proudu.

Ekvivalentní oteplovací proud vypočítáme dle vztahu:

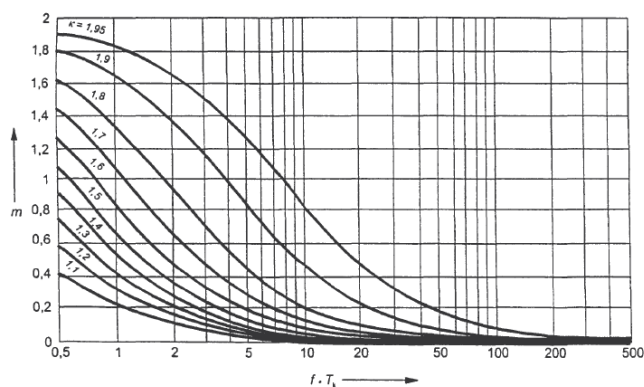
$$I_{th} = I''_k \sqrt{m + n} \quad (36)$$

Kde:

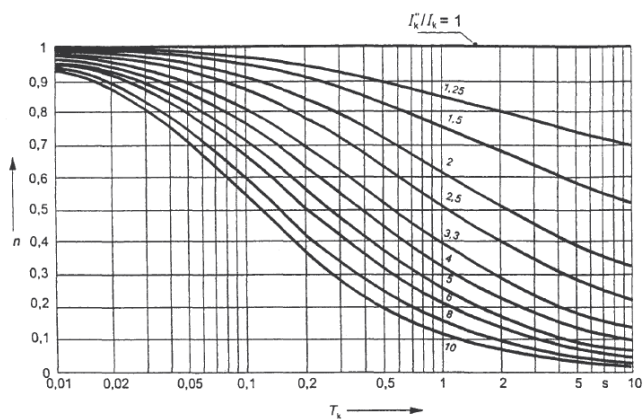
I''_k Počáteční souměrný trojfázový rázový zkratový proud.

m Součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky.

n Součinitel pro tepelné účinky střídavé složky.



Obr. 16a



Obr. 16b

Obr. 16a Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu

Obr. 16b Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

4. Výpočet zkratových poměrů na rozvodnách průmyslového podniku

Kontrola zkratové odolnosti rozveden vn průmyslového podniku, výpočet maximálních zkratových poměrů.

Parametry jednotlivých prvků

Transformátory:

T201: $S_T = 10 \text{ MVA}$; $u_k = 7,33\%$; 22/6kV; 262/917A

T202: $S_T = 10 \text{ MVA}$; $u_k = 7,3\%$; 22/6kV; 262/917A

T11: $S_T = 5 \text{ MVA}$; $u_k = 5,98\%$; 22/6kV; 131/458A

T12: $S_T = 5 \text{ MVA}$; $u_k = 5,97\%$; 22/6kV; 131/458A

Synchronní motory:

SM2: $S = 4,4 \text{ MVA}$; $I = 423 \text{ A}$

SM3: $S = 4,2 \text{ MVA}$; $I = 405 \text{ A}$

Kabelová vedení:

V1: 22 ANKT.; $2 \times 3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 220 \text{ m}$

V2: 22 ANKTOPV; $3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 850 \text{ m}$

V3: 6 ANKAY; $3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 1600 \text{ m}$

V4: 6 ANKAY; $2 \times 3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 80 \text{ m}$

V9: 6 AYKCY; $3 \times 3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 250 \text{ m}$

V10: 6 AKPH; $2 \times 2 \times 3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 30 \text{ m}$

V11: 22 ANKTOP; $2 \times 3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 90 \text{ m}$

V12: 22 ANKT; $3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 510 \text{ m}$

V14: 6 ANKY; $2 \times 3 \times 185 \text{ mm}^2$; $l = 230 \text{ m}$

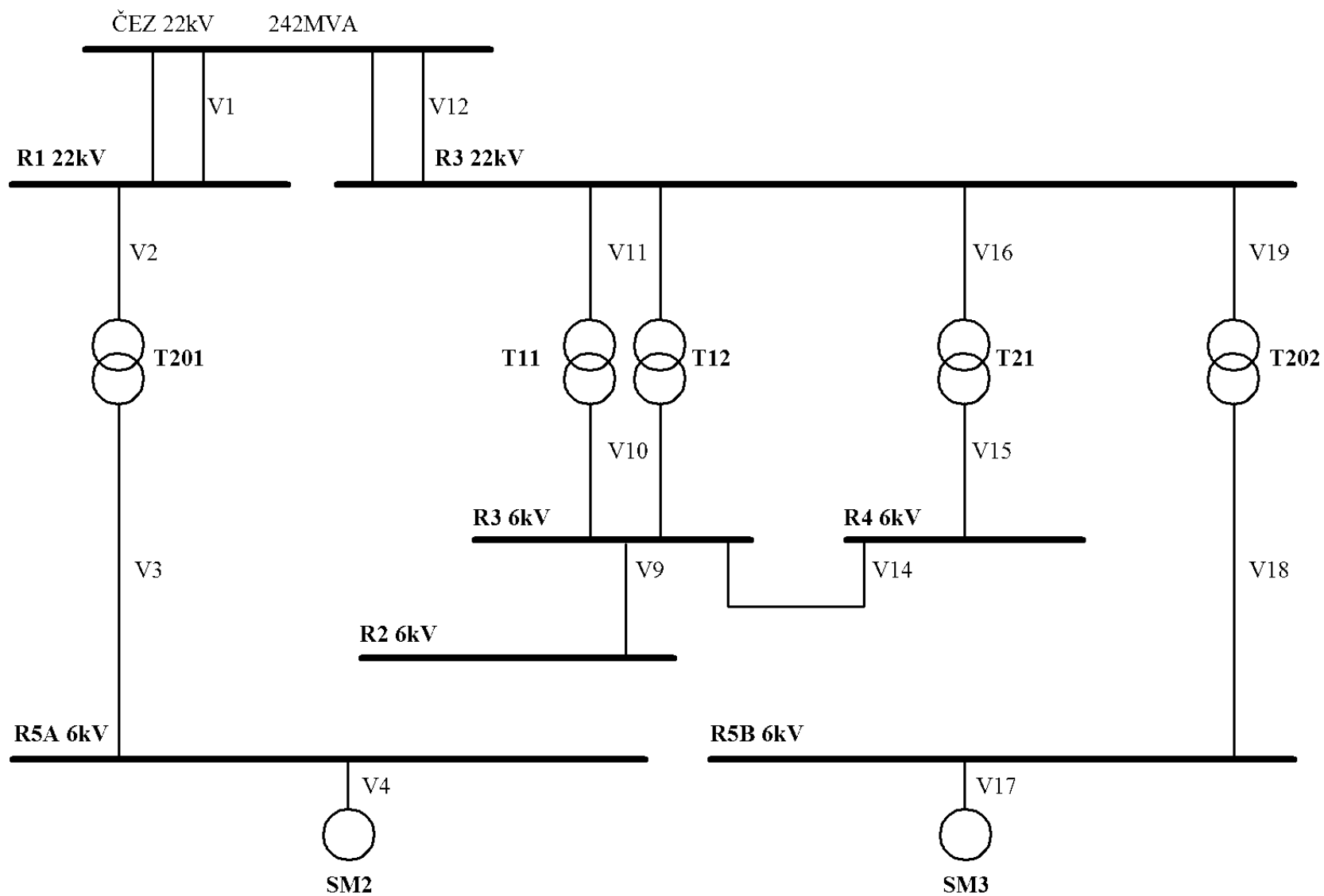
V15: 6 ANKAY; $3 \times 3 \times 150 \text{ mm}^2$; $l = 45 \text{ m}$

V16: 22 ANKTOP; $3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 220 \text{ m}$

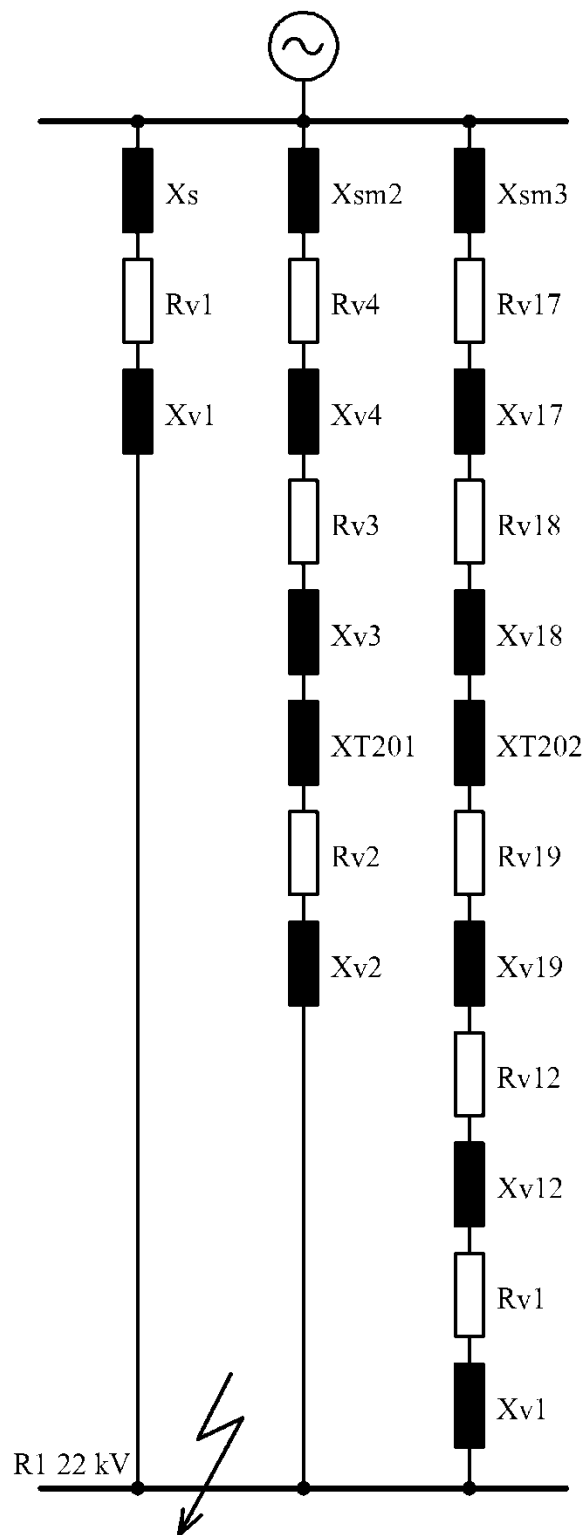
V17: 6 AKPH; $2 \times 3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 200 \text{ m}$

V18: 6 ANKAY; $3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 120 \text{ m}$

V19: 22 ANKTOP; $3 \times 240 \text{ mm}^2$; $l = 550 \text{ m}$



Obr. 17 Schéma průmyslového podniku



Obr. 18 Náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R1 22kV

Vztažný výkon $S_V = 1000 \text{ MVA}$

Reaktance soustavy

$$X_S = \frac{c \cdot S_V}{S_K} = \frac{1,1 \cdot 1000 \cdot 10^6}{242 \cdot 10^6} = 4,55$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V1

$$R_{V1} = \frac{R_V \cdot l_V}{2} \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{0,149 \cdot 0,22}{2} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,034$$

$$X_{V1} = \frac{X_V \cdot l_V}{2} \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{0,088 \cdot 0,22}{2} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,02$$

Induktivní reaktance synchronního stroje SM2

$$X_{SM2} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{S_G} = \frac{0,07 \cdot 1000 \cdot 10^6}{4,4 \cdot 10^6} = 15,91$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V4

$$R_{V4} = \frac{R_V \cdot l_V}{2} \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{0,149 \cdot 0,08}{2} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 0,166$$

$$X_{V4} = \frac{X_V \cdot l_V}{2} \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{0,078 \cdot 0,08}{2} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 0,087$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V3

$$R_{V3} = R_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,149 \cdot 1,6 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 6,622$$

$$X_{V3} = X_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,078 \cdot 1,6 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 3,467$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V2

$$R_{V2} = R_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,149 \cdot 0,85 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,262$$

$$X_{V2} = X_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,088 \cdot 0,85 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,155$$

Induktivní reaktance transformátoru T201

$$X_{T201} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_V}{S_T} = \frac{7,33}{100} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 7,33$$

Induktivní reaktance synchronního stroje SM3

$$X_{SM2} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{S_G} = \frac{0,07 \cdot 1000 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 16,67$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V17

$$R_{V17} = \frac{R_V \cdot l_V}{2} \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 0,414$$

$$X_{V17} = \frac{X_V \cdot l_V}{2} \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 0,217$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V18

$$R_{V18} = R_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 0,497$$

$$X_{V18} = X_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6000^2} = 0,26$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V19

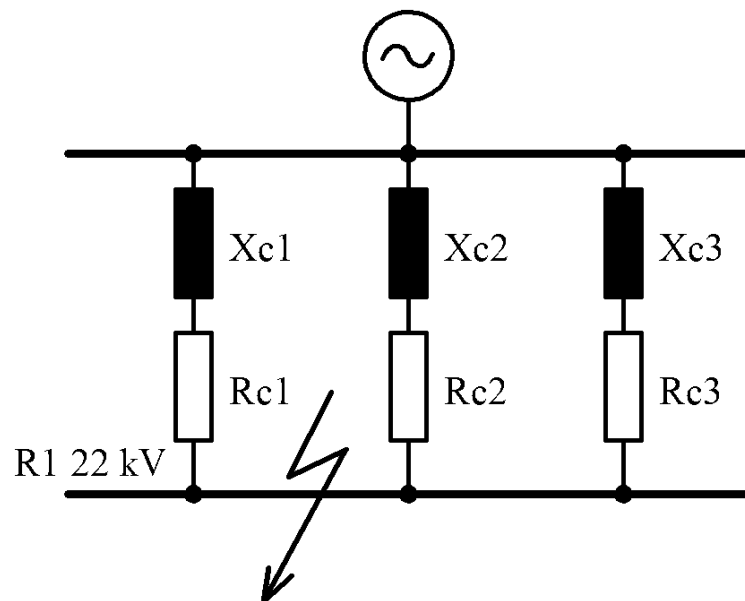
$$R_{V19} = R_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,169$$

$$X_{V19} = X_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,1$$

Činný odpor a induktivní reaktance vedení V12

$$R_{V12} = R_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,149 \cdot 0,51 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,157$$

$$X_{V12} = X_V \cdot l_V \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,088 \cdot 0,51 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,093$$



Obr. 18 Zjednodušené náhradní schéma pro zkrat v rozvodně R1 22kV

Celkové impedance jednotlivých paralelních větví

$$Z_{C1} = R_{V1} + jX_{V1} + jX_S = R_{C1} + X_{C1} = 0,034 + j4,57$$

$$Z_{C2} = jX_{SM2} + R_{V4} + jX_{V4} + R_{V3} + jX_{V3} + R_{V2} + jX_{V2} + jX_{T201} = R_{C2} + X_{C2} = 7,05 + j26,95$$

$$Z_{C3} = jX_{SM3} + R_{V17} + jX_{V17} + R_{V18} + jX_{V18} + jX_{T202} + R_{V19} + jX_{V19} + R_{V12} + jX_{V12} + R_{V1} + jX_{V1} = \\ = R_{C3} + X_{C3} = 1,27 + j24,66$$

Výsledná impedance

$$Z_C = \frac{1}{\frac{1}{Z_{C1}} + \frac{1}{Z_{C2}} + \frac{1}{Z_{C3}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,034 + j4,57} + \frac{1}{7,05 + j26,95} + \frac{1}{1,27 + j24,66}} = 0,148 + j3,39$$

Absolutní hodnota výsledné impedance

$$|Z_C| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{0,148^2 + j3,39^2} = 3,4$$

Vztažný proud

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{1000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22000} = 26,24 \text{ kA}$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I_K'' = \frac{c \cdot I_V}{|Z_C|} = \frac{1,1 \cdot 26,24 \cdot 10^3}{3,4} = 8,5 \text{ kA}$$

Zkratový výkon

$$S_K = \frac{c \cdot S_V}{|Z_C|} = \frac{1,1 \cdot 1000 \cdot 10^6}{3,4} = 323,9 \text{ MVA}$$

Obdobným způsobem byly vypočítány hodnoty celkové impedance, absolutní hodnoty výsledné impedance, počátečního souměrného rázového zkratového proudu a zkratového výkonu na zbylých rozvodnách.

Rozvodna R2 6kV

$$Z_C = 1,453 + j6$$

$$|Z_C| = 6,128$$

$$I_K'' = 18,64 \text{ kA}$$

$$S_K = 193,7 \text{ MVA}$$

Rozvodna R4 6kV

$$Z_C = 0,451 + j5,482$$

$$|Z_C| = 5,5$$

$$I_K'' = 19,24 \text{ kA}$$

$$S_K = 199,9 \text{ MVA}$$

Rozvodna R3 6kV – sepnuté V14

$$Z_C = 0,388 + j5,45$$

$$|Z_C| = 5,464$$

$$I_K'' = 19,37 \text{ kA}$$

$$S_K = 201,3 \text{ MVA}$$

Rozvodna R5A 6kV

$$Z_C = 1,437 + j6,69$$

$$|Z_C| = 6,84$$

$$I_K'' = 4,22 \text{ kA}$$

$$S_K = 160,8 \text{ MVA}$$

Rozvodna R3 6kV – rozepnuté V14

$$Z_C = 0,385 + j6,41$$

$$|Z_C| = 6,419$$

$$I_K'' = 16,5 \text{ kA}$$

$$S_K = 171,4 \text{ MVA}$$

Rozvodna R5B 6kV

$$Z_C = 0,464 + j5,933$$

$$|Z_C| = 5,951$$

$$I_K'' = 4,85 \text{ kA}$$

$$S_K = 184,8 \text{ MVA}$$

Rozvodna R3 22kV

$$Z_C = 0,216 + j3,429$$

$$|Z_C| = 3,44$$

$$I_K'' = 8,4 \text{ kA}$$

$$S_K = 320,19 \text{ MVA}$$

5. Posouzení zkratové odolnosti rozvoden

Srovnání jmenovitých zkratových odolností rozvoden a vypočtených zkratových výkonů je uvedeno v tabulce 2. Ve všech rozvodnách byla zkratová odolnost vyhovující kromě rozvodny R3 6kV, v této rozvodně byl jmenovitý zkratový výkon překročen o 1MVA. Pokud by byl průmyslový podnik provozován s rozepnutým vedením V14, pak by se zkratový výkon v rozvodně R3 6kV snížil na hodnotu 171 MVA, což je hodnota menší než jmenovitý zkratový výkon v daném místě.

rozvodna	jmenovitý zkratový výkon	vypočtený zkratový výkon
R1 22kV	400MVA	324MVA
R2 6kV	200MVA	194MVA
R3 22kV	400 MVA	320MVA
R3 6kV	200MVA	201MVA
R4 6kV	350MVA	200MVA
R5A 6kV	350MVA	161MVA
R5B 6kV	350MVA	185MVA

Tab. 2 Porovnání zkratových výkonů jednotlivých rozvoden

Závěr

Cílem bakalářské práce byl výpočet maximálních zkratových poměrů jednotlivých rozvodů průmyslového podniku.

První kapitola práce je zaměřena na problematiku průmyslových rozvodů, elektrizační soustavu, její složky a požadavky na soustavu kladené.

Ve druhé kapitole jsou rozebrány základní pojmy týkající se zkratové problematiky, podstata vzniku zkratů, základní typy zkratů a účinky působení zkratového proudu na elektrický obvod.

Třetí kapitola čerpá z platné normy ČSN - EN 60909. Vzhledem k rozsahu práce jsou z normy vybrány jen její nejdůležitější části tak, aby práce dala čtenáři nahlédnout do problematiky výpočtu zkratových proudů. Jsou zde rozebrány zjednodušující předpoklady výpočtu, které zcela přesně neodpovídají skutečnosti, ale zajišťují dostatečnou přesnost výsledků. Kapitola dále obsahuje metody výpočtu zkratových impedancí jednotlivých zařízení elektrizační soustavy a jednotlivých složek zkratového proudu.

Ve čtvrté kapitole, v praktické části, je proveden výpočet zkratových výkonů pro souměrný trojfázový zkrat. Pro rozvodnu R1 22kV je uveden podrobný postup výpočtu včetně náhradního schématu. Ostatní rozvodny jsou vloženy v příloze a jsou uvedeny pouze výsledky. Výpočet byl proveden metodou poměrných jednotek.

Zhodnocení výsledků je uvedeno v kapitole páté. V rozvodně R3 6kV došlo k překročení zkratové odolnosti o 1MVA. Jmenovitý zkratový výkon v daném místě je 200MVA a vypočtený zkratový výkon vyšel 201 MVA. Jedno z možných řešení je provozovat průmyslový podnik s rozepnutým vedením V14, tím by se zkratový výkon v rozvodně R3 6kV snížil na 171 MVA.

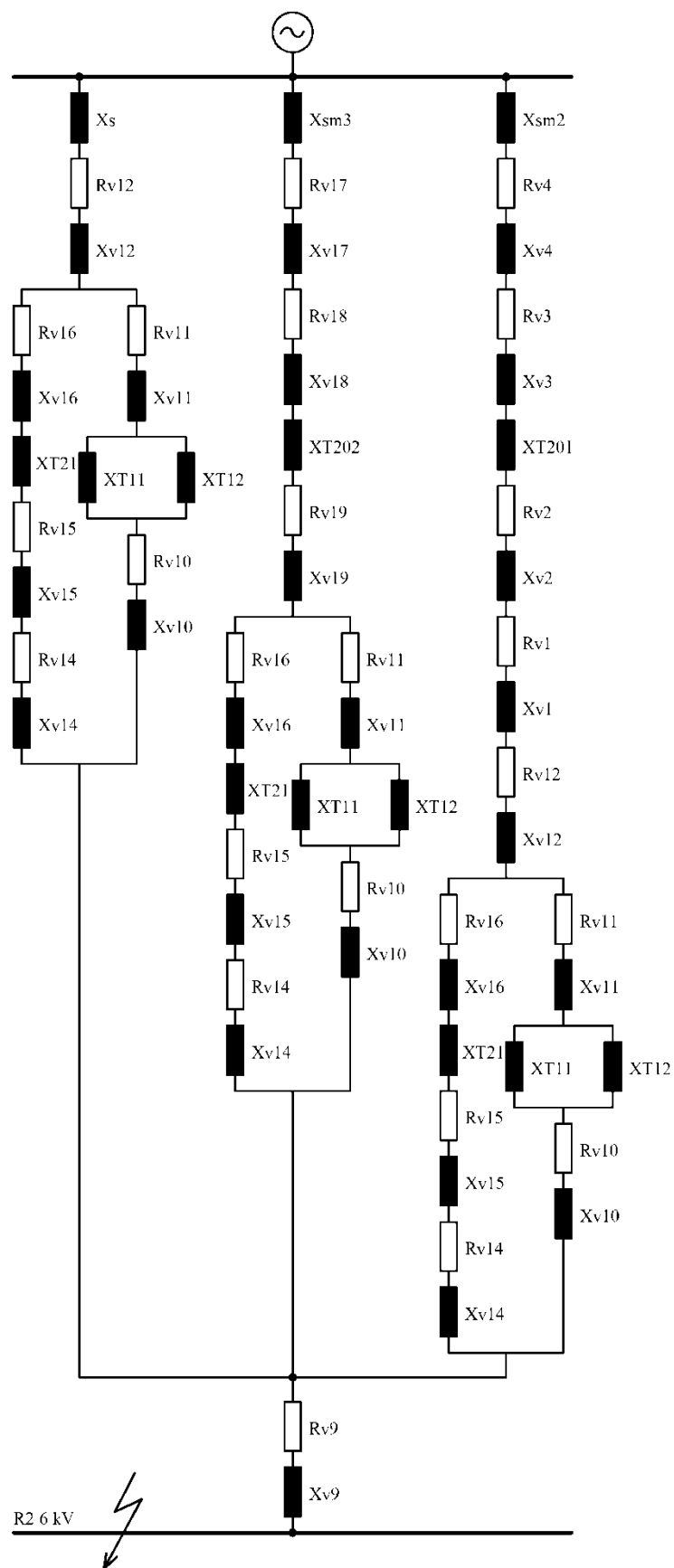
Literatura

- [1] Krychtálek, Z. – Pauza, J.: Elektrické stanice. Praha, SNTL 1989
- [2] Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení. 2. Vydání, Skripta VŠB – TUO, Ostrava, 2002
- [3] Norma ČSN EN 60909 – 0: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách.
- [4] Trojánek, Z., Hájek, P., Kvasnica, P.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987
- [5] Medvec, Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách, VŠB – TUO, Ostrava, 2001
- [6] www.tzb-info.cz/4035-druhy-elektrického-silnoprouteho-rozvodu

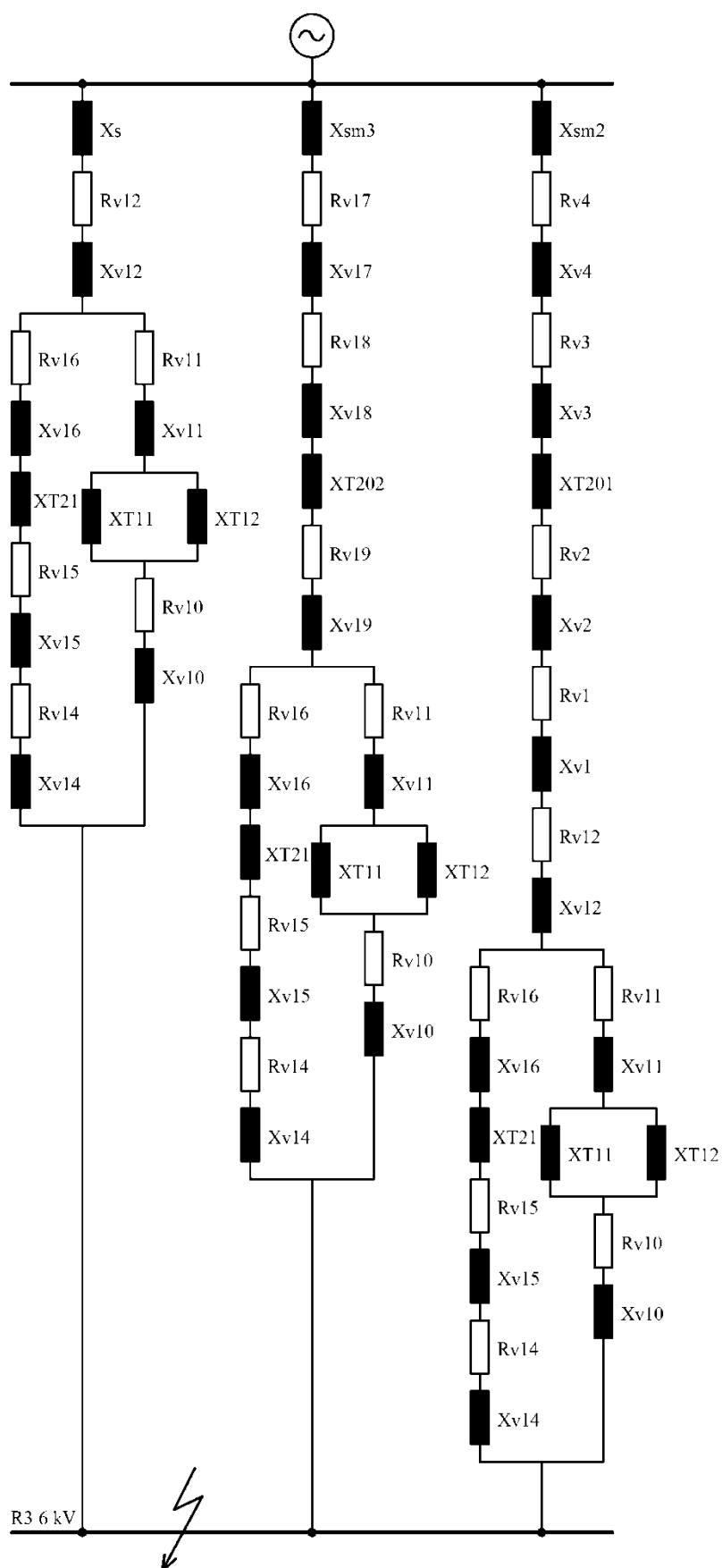
Seznam příloh

- I. Náhradní schémata rozvodny R2 6kV
- II. Náhradní schémata rozvodny R3 6kV
- III. Náhradní schémata rozvodny R3 22kV
- IV. Náhradní schémata rozvodny R4 6kV
- V. Náhradní schémata rozvodny R5A 6kV
- VI. Náhradní schémata rozvodny R5B 6kV

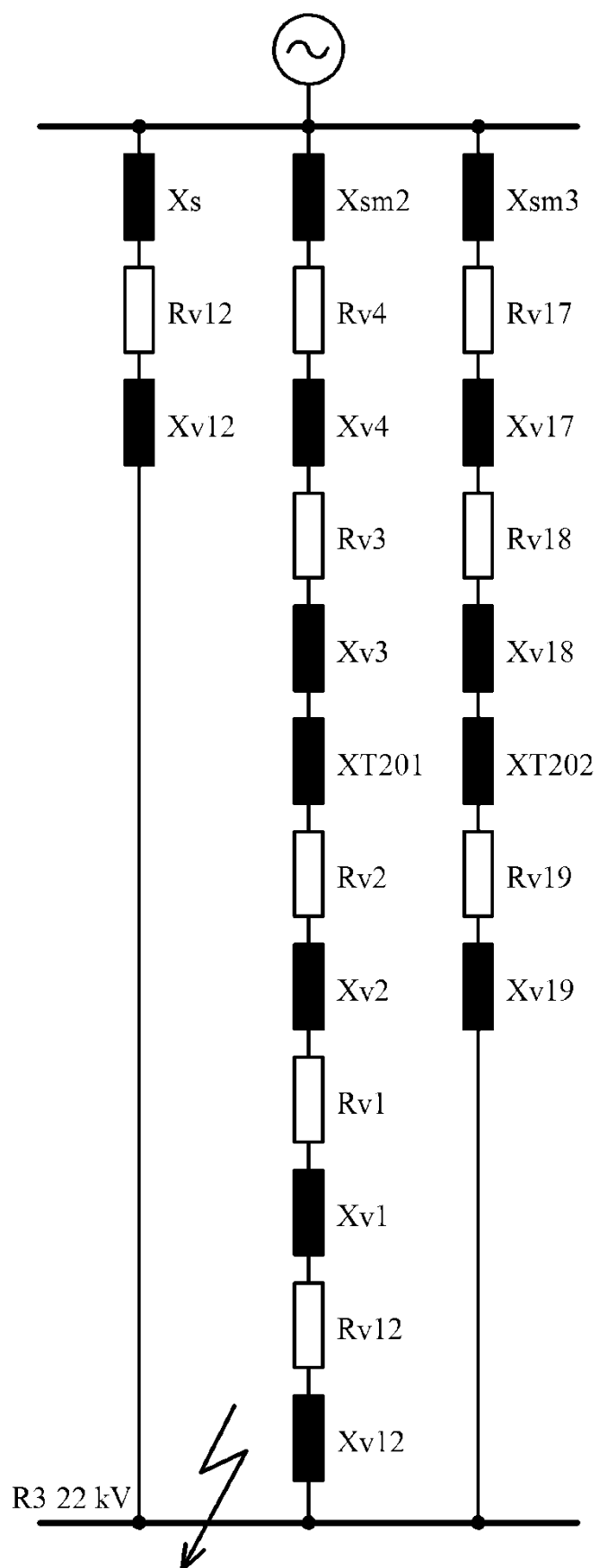
I. Náhradní schémata rozvodny R2 6kV



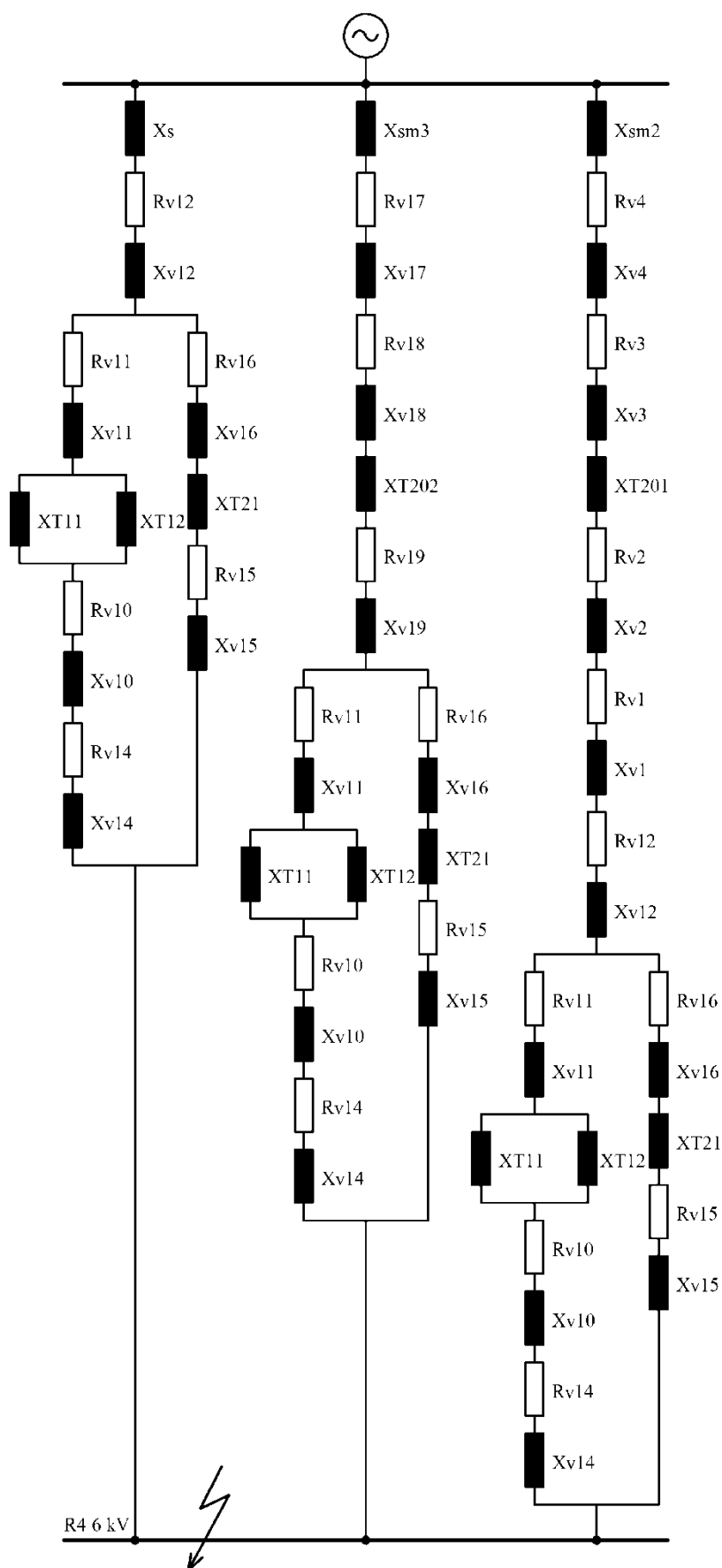
II. Náhradní schémata rozvodny R3 6kV



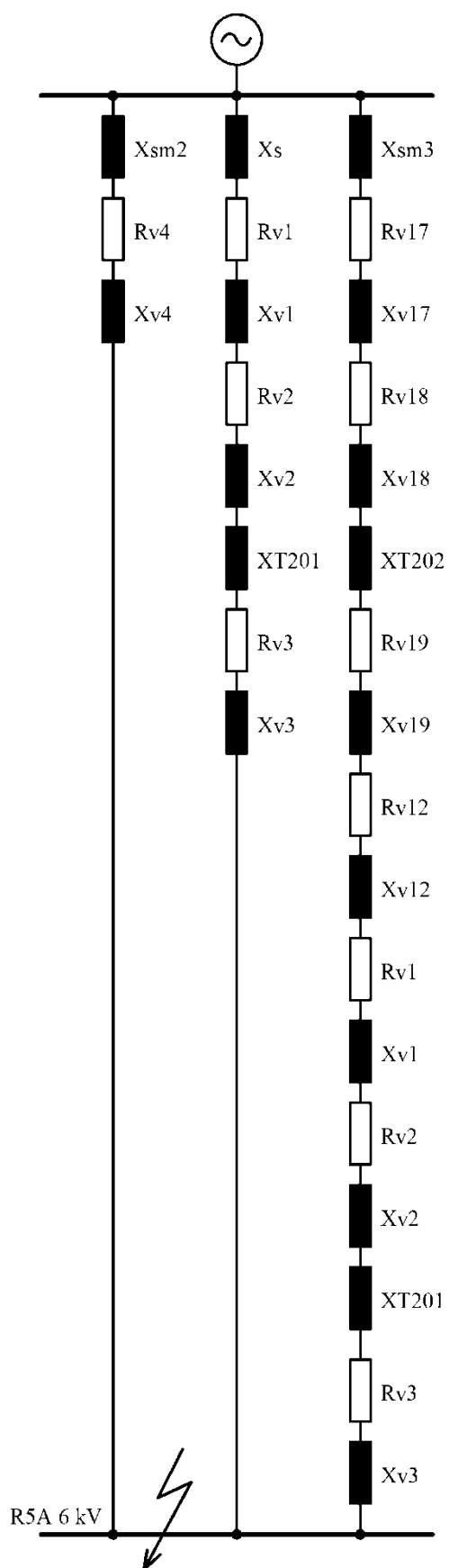
III. Náhradní schémata rozvodny R3 22kV



IV. Náhradní schémata rozvodny R4 6kV



V. Náhradní schémata rozvodny R5A 6kV



VI. Náhradní schémata rozvodny R5B 6kV

